3П

УДК 004.942

О.Н. Петров
Государственный морской технический университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Контроль режима функционирования бортовой интеллектуальной системы в нештатных и экстремальных ситуациях

Обсуждаются алгоритмы контроля режима функционирования интеллектуальной системы в условиях эксплуатации. Основное внимание обращается на оценку нестандартных и экстремальных ситуаций с помощью нечеткой системы знаний. Приведены примеры тестирования базы знаний оценки риска принимаемых решений.

Разработка методов и моделей формализации динамической базы знаний, обеспечивающей функционирование бортовой интеллектуальной системы (ИС) безопасности эксплуатации судов в нестандартных, особенно в нештатных и экстремальных ситуациях, является актуальной проблемой при оценке и прогнозе динамики судна на волнении [1-9]. Повышение надежности и качества принимаемых решений в бортовых ИС достигается на основе динамической базы знаний и высокопроизводительных средств обработки измерительной информации в мультипроцессорной вычислительной среде [6]. Для реализации алгоритмов обработки информации при контроле режима функционирования ИС на основе динамической базы знаний, необходимо:

– разработать механизмы преобразования информации при построении динамической базы знаний, обеспечивающей решение задач анализа и интерпретации данных измерений в режиме реального времени;
– выделить структуры, методы и модели, описывающие поведение судна в нестандартных ситуациях;
– разработать адаптивные алгоритмы контроля динамики судна в нестандартных ситуациях и установить закономерности между особенностями исследуемых процессов и поведением судна при различной интенсивности внешних возмущений.

Методы и модели, обеспечивающие функционирование динамической базы знаний, позволяют исследовать динамические процессы в условиях неопределенности и неполноты исходной информации. При построении алгоритмов и программного обеспечения ИС основное внимание уделяется использованию адаптивных моделей анализа и интерпретации информации в режиме реального времени.

1. Постановка задачи

Анализ современного состояния проблемы позволяет сформулировать задачу исследования, выделив наиболее важные ее аспекты, подлежащие рассмотрению в рамках подхода к обработке информации в мультипроцессорной вычислительной среде [6]. Среди них наибольший интерес представляет разработка математических моделей, алгоритмов и программного обеспечения задач принятия решений при функционировании бортовых интеллектуальных систем новых поколений [9].

Задача исследования состоит в обосновании структуры модели динамической базы знаний ИС при анализе и интерпретации информации в сложных ситуациях, разработке алгоритмов и программного обеспечения функционирования динамической базы знаний при обработке информации в нестандартных ситуациях, проведении вычислительного эксперимента по исследованию особенностей поведения судна в условиях неопределенности и неполноты исходной информации, генерации сценариев взаимодействия, анализе альтернатив и выборе предпочтительной вычислительной технологии обработки информации в нестандартных ситуациях, разработке и тестировании программного комплекса. Формализация поставленных задач осуществлена на основе концепции мягких вычислений и процедур обработки информации в рамках принципа конкуренции. В рамках сформулированной задачи конкретизированы основные направления исследования:

– нечеткая модель обработки измерительной информации при контроле режима функционирования и анализе сложных ситуаций в бортовых ИС;

– модель динамической базы знаний, функционирующая на основе принципа адаптивного резонанса;

– результаты математического моделирования сложных ситуаций в бортовых ИС реального времени.

Среди этих направлений центральное место занимает задача анализа и синтеза ИС, функционирующей в нечеткой среде, анализ результатов исследования с целью выявления закономерностей поведения судна в сложных ситуациях, формулировка нечеткого логического базиса, обеспечивающего надежность алгоритмов и программного обеспечения. Измерительная информация, используемая при контроле режимов функционирования ИС, представляет собой стохастическую дискретную систему с r-мерным пространством входов. Выходы системы в заданный момент времени представляют собой параметры колебательного движения судна на волнении.

2. Концептуальная модель динамической базы знаний

Формирование концептуальной модели функционирования динамической базы знаний ИС предусматривает генерацию альтернативных концепций, анализ вариантов и выбор предпочтительной технологии. Такая формализация определяет создание процедур и разработку различных подходов к выбору предпочтительного варианта решения из множества альтернатив на основе различных методов поиска решений: методы экспертного оценивания, анализ альтернатив в нечеткой среде и методы, основанные на построении логической системы знаний. Анализ показал, что наиболее предпочтительным вариантом построения динамической базы знаний является использование логической системы знаний на основе принципа адаптивного резонанса. Анализ систем, основанных на знаниях, позволяет представить формальную модель информационной среды M(S) анализа нештатных и экстремальных ситуаций при функционировании бортовой ИС в виде обобщенной структуры:

$$M(S) = \langle F(S), S(t), B(AR), D(Q,W,V), U(PC) \rangle, \qquad (1)$$

где F(S) – функциональные компоненты; S(t) – исследуемые ситуации; B(AR) – динамическая база знаний, построенная на основе принципа адаптивного резонанса; D(Q,W,V) – обобщенная база данных; U(PC) – управляющий программный комплекс.

Функциональными компонентами F(CS) являются исполняемые модули прикладных систем и служебные модули, обеспечивающие совместную работу объединяемых систем. Эти модули взаимодействуют с динамической базой знаний B(AR) и обобщенной базой данных D(W,V). Управляющий программный комплекс U(PC) обеспечивает функционирование системы M(S).

Обобщенная база данных D(Q,W,V) формируется в соответствии с общими принципами построения баз данных бортовых ИС и содержит данные о судне Q, характеристиках волнения W и ветра V. Структура управления программными системами представлена на основе сетевых моделей упорядочения событий в соответствии с логикой системы и потоком информации в текущей ситуации. Многопроцессорный вычислительный комплекс обрабатывает поток информации в зависимости от особенностей рассматриваемой ситуации. Информационная среда анализа и интерпретации нестандартных ситуаций обеспечивает интеллектуальную поддержку оператора ИС (рис. 1).



Рисунок 1 – Информационная среда анализа и интерпретации нестандартных ситуаций

При формализации знаний и механизма логического вывода важное значение имеет организация адаптивной компоненты на основе принципов обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде. Одно из направлений ее организации связано с реализацией принципа адаптивного резонанса, получившего широкое распространение при построении и обучении нейронных сетей [10]. Формируемые на основе этого принципа свойства базы знаний наиболее четко проявляются при обеспечении функционирования ИС в задачах интерпретации экстремальных ситуаций.

Алгоритм идентификации текущей ситуации, реализуемый адаптивной компонентой базы знаний (рис. 2) и состоит в реализации последовательности шагов [7].

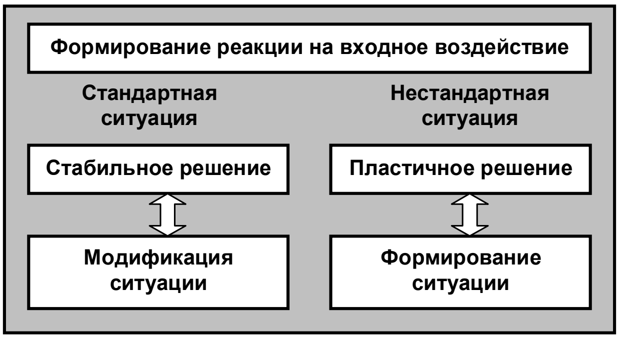


Рисунок 2 – Адаптивная компонента базы знаний

Шаг 1. Рассматривается входной образ и соответствующие функции принадлежности (ФП), автоматически построенные для элементов антецедентной части нечеткого логического правила на основе текущей измерительной информации. Если динамическая база знаний не содержит правила, соответствующего нечетким исходным данным, то успешным считается тест «новизны», текущая ситуация рассматривается как новая (нестандартная) и осуществляется переход к шагу 3. В противном случае

(при удачном поиске в базе знаний) рассматриваемая ситуация считается как «образ», приводящий к возникновению «адаптивного резонанса» с определенным логическим правилом (группой правил). В результате «стабильного» решения о совпадении с имеющимся образом (ситуацией) с помощью алгоритма нечеткого вывода (импликация по Мамдани или Сугено [11]) на основе имеющихся продукционных правил определяется выход нечеткой системы y^i. В частности, используя импликацию по Сугено, получаем:

$$y^{*i} = \eta^*(x^i) = \sum_{r=1,\dots,m} y_r\, \alpha_r(x^i) \,/\, \sum_{r-1,\dots,m} \alpha_r(x^i), \qquad (2)$$

где $\alpha r((x_i) = \min\{\mu_{r1}(x_1^{\,i}), \mu_{r2}(x_2^{\,i}), \dots, \mu_{rn}(x_n^{\,i})\}$ – степень истинности предпосылки r-го правила; $\mu_{rj}(\cdot)$ – ФП нечеткого множества A_{rj}.

Шаг 2. Проверяется неравенство:

$$|y^{*i} - y^i| \le \varepsilon. \qquad (3)$$

При невыполнении неравенства (3) переход к шагу 3, иначе переход к шагу 4.

Шаг 3. На основе «пластичного» решения о появлении нестандартной ситуации формируется новый входной образ (ситуация) и база знаний пополняется правилом:

$$P_{m+1}\text{: if } x_1 \text{ is } A_{(m+1)1} \& \dots \& \; x_j \text{ is } A_{(m+1)j} \& \dots \& \; x_n \text{ is } A_{(rn+1)n}, \text{ then } y = y_{r+1}, \qquad (4)$$

где $A_{(m+1)1}, \dots, A_{(m+1)j}, \dots, A_{(rn+1)n}$ – нечеткие множества, откорректированные с учетом изменения динамики объекта и гауссовых ФП

$$\mu_{\;(m+1)j}(x_j) = \exp[-((x_j - \alpha_{(m+1)j}) \,/\, \lambda)^2; \qquad (5)$$

$\alpha_{(m+1)j} = x_{ji}$ – центры нечетких чисел $A_{(m+1)j}$; λ – постоянный параметр.

Значение m модифицируется: m = m + 1. Переход к шагу 4.

Шаг 4. Устанавливается номер очередной «обучающей» точки: I = i + 1. Переход к шагу 1.

Шаг 5. Если процедуры, реализуемые шагами 1 – 4, не приводят к желаемому результату, то осуществляется модификация логического правила, имеющего наибольшее «сходство» с исходной информацией, поступившей на вход нечеткой системы. Эта процедура реализуется путем перестройки исходных значений ФП с учетом непрерывного изменения динамики объекта и внешней среды.

Таким образом, осуществляется динамическая самоорганизация нечеткой системы знаний за счет «наращивания» новых и модификации наиболее «схожих» правил.

3. Контроль режима функционирования ИС

Процессы, формирующие информационный массив при исследовании нештатных и экстремальных ситуаций, характеризуются следующими особенностями [1]: многомерность и многокомпонентность, связанные с учетом протяженности во времени и рассредоточенностью в пространстве, а также с непосредственным учетом многих, в том числе и зависимых факторов; многомасштабность – наличие в частотном спектре состояния ДО различных частотных зон, соответствующих физически независимым явлениям; связность информационных каналов; зависимость между компонентами канала во времени. Большое число непредсказуемых факторов, протяженность во времени и пространстве процессов, формирующих исходный информационный массив, приводит к необходимости его описания с помощью модели нестационарных неоднородных многомерных случайных полей. Динамика этих полей обусловлена непрерывным поступлением данных при функционировании ИС с различными информационными каналами и результатами ассимиляции в предыдущие моменты времени. Практическая реализация разработанных моделей связана со следующими интерпретациями:

– *фильтрация и контроль данных измерений* в предположении, что вектор экзогенных переменных X_t и оператор преобразования информации F[•] известны, а неизвестный вектор Y_t может быть определен в результате отфильтрованного по диапазонам частот сигнала с помощью рекурсивного полосового фильтра Баттерворта [1] с заранее выбранной передаточной функцией;

– *идентификация моделей*, при которой векторы входного и выходного процессов X_t и Y_t известны, а структура оператора F[•] и «мешающего» процесса неизвестны Z_t. Эта задача соответствует спектральной регрессии и сводится к определению параметров передаточной функции и характеристик процесса.

Контроль динамики взаимодействия ДО с внешней средой, уровней опасности различных нарушений в его поведении и формирование соответствующих критериев осуществляется на основе методов и моделей, позволяющих формализовать допустимость отклонений от режима нормальной эксплуатации и оценить их безопасность. При решении этой задачи важное значение приобретает информация, накопленная в процессе функционирования ИС в различных условиях эксплуатации. Идентификация математических моделей, характеризующих нештатные и экстремальные ситуации, осуществляется на основе статистического анализа данных измерений, полученных в условиях эксплуатации ИС, а также в процессе имитационного моделирования взаимодействия ДО с внешней средой. Временные кривые исследуемых процессов представляются в следующем виде [2], [4]:

$$\Re(t_i) = F(t_i) + \Im(t_i) + S(t_i). \qquad (6)$$

Здесь под $\Re(t_i)$ понимаются исследуемые процессы $\zeta(t_i)$, $\theta(t_i)$, $\Psi(t_i)$; $F(t_i)$ – медленно меняющаяся функция времени (тренд)$_i$; $\Im(t_i)$ – периодическая (циклическая) составляющая; $S(t_i)$ – стохастическая составляющая:

$$S(t_i) = \xi(t_i) + \varepsilon(t_i), \qquad (7)$$

где $\xi(t_i)$ – независимая случайная последовательность (шум) с математическим ожиданием $M[\xi(t_i)] = 0$ и дисперсией $\sigma_\varepsilon^2(t_i)$; $\varepsilon(t_i)$ – последовательность случайных событий («выбросов»), которые представляют собой аномальные наблюдения в случайные моменты времени τ_i:

$$\varepsilon(t_i) = \begin{cases} A_i, & if \quad t_i = \tau \\ 0, & if \quad t_i \neq \tau \end{cases}. \qquad (8)$$

Здесь A_i – амплитуда аномального наблюдения, значительно превышающая размах исходного ряда наблюдений. Последовательность аномальных наблюдений при контроле режима функционирования ИС образует пуассоновский поток событий.

Построение модели (6) при обработке экспериментальных данных сводится к идентификации аналитического представления каждого слагаемого. В качестве методов оценивания допустимых отклонений удобно использовать нечеткие методы, заложенные в основу представления базы знаний ИС. При формализации неопределенностей степень соответствия режиму нормальной эксплуатации задается в виде соответствующих нечетких множеств и функций принадлежности [8]. Так, например, при контроле режима функционирования ИС в новых условиях важное значение приобретает оценка возможности возникновения резонансных режимов качки. ФП,

позволяющая выделять режимы основного и параметрического резонанса, имеет вид:

$$\mu\left(\sigma/\omega\right)=\begin{cases}1, & 0<\sigma/\omega<0.8,\ 1.2<\sigma/\omega<1.9,\ \sigma/\omega>2.1;\\ 0\le\mu\left(\sigma/\omega\right)\le 1, & 0.8\le\sigma/\omega\le 1.2,\ 1.9\le\sigma/\omega\le 2.1;\\ 0, & \sigma/\omega=1,\ \sigma/\omega=2.\end{cases} \quad (9)$$

Если задана необходимая степень (уровень) соответствия $\alpha\in[0,1]$, то можно установить границы для допустимых вариаций интенсивностей аномальных данных. В рамках этих границ наблюдаемая интенсивность соответствует режиму нормальной работы. Выход новой оценки исследуемого параметра за заданные пределы может трактоваться как полное несоответствие прежнему состоянию, что приводит к необходимости перестройки модели и анализу причин вмешательства в нормальный режим.

Степень соответствия спектральных характеристик новых наблюдений исходным данным определяется с помощью нечеткого множества B = {(s,μ(s))} [4], [8], с ФП μ(S) среднеквадратического отклонения шумовой составляющей новых наблюдений режиму нормальной работы системы с заданным отклонением. Другой вариант, связанный с необходимостью повторного определения ξ(t) – сильно возросший размах колебаний данных относительно среднего уровня [8] (рис. 3).

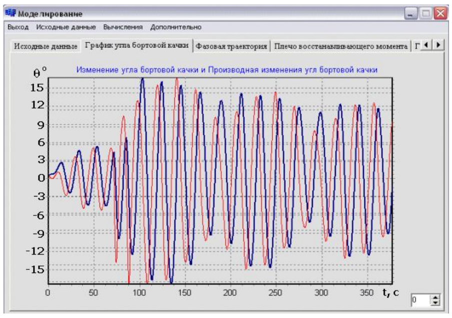


Рисунок 3 – Возникновение значительной амплитуды колебаний при воздействии крупной одиночной волны в составе нерегулярного волнения

Выбор степени соответствия $\alpha\in[0,1]$ определяет границу допустимых вариаций исследуемого параметра S с помощью уравнения μ(S) = α. При $S \le S_\alpha$ можно считать, что спектральная характеристика осталась неизменной. ФП, задающая степень соответствия спектральных характеристик новых наблюдений исходному ряду μ(s), в простейшем случае, когда форма кривой спектральной плотности не изменилась, может быть определена в виде [4]:

$$\mu(s)=\begin{cases}1 \text{ при } 0\le s<0{,}4S;\\ 1-2(s-0{,}4S) \text{ при } 0{,}4S\le s<0{,}9S;\\ 0 \text{ при } 0{,}9S\le s,\end{cases} \quad (10)$$

где s – среднеквадратическое отклонение шумовой составляющей.

При сложных спектрах представление (10) корректируется в соответствии с классификацией кривых спектральной плотности в рамках концепции «климатических спектров» [12].

ФП, определяющая выброс при контроле режима функционирования ИС, представляется в виде ступенчатой кривой [8]:

$$\mu\left(\theta,\psi\right)=\begin{cases}1, & (\theta,\psi)/(\theta^*,\psi^*)<2;\\ 0, & (\theta,\psi)/(\theta^*,\psi^*)\ge 2.\end{cases} \quad (11)$$

4. Особенности динамики экстремальных ситуаций

При исследовании экстремальных ситуаций теоретический и практический интерес представляют физические картины развития колебательного движения ДО в режимах основного и параметрического резонансов при прохождении групп волн различной формы и интенсивности. Установлено, что в этих условиях формируются сложные структуры колебательных режимов бортовой и килевой качки. Особенность этих структур состоит в том, что аттракторные множества имеют вид неустойчивых предельных циклов. Потеря устойчивости цикла-аттрактора в рассматриваемой системе происходит по различным сценариям. Интерпретация различных сценариев свидетельствует о том, что при воздействии пакета волн формируется предельный цикл (рис. 4), характеризующийся стабилизацией амплитуды колебаний вследствие влияния нелинейности.

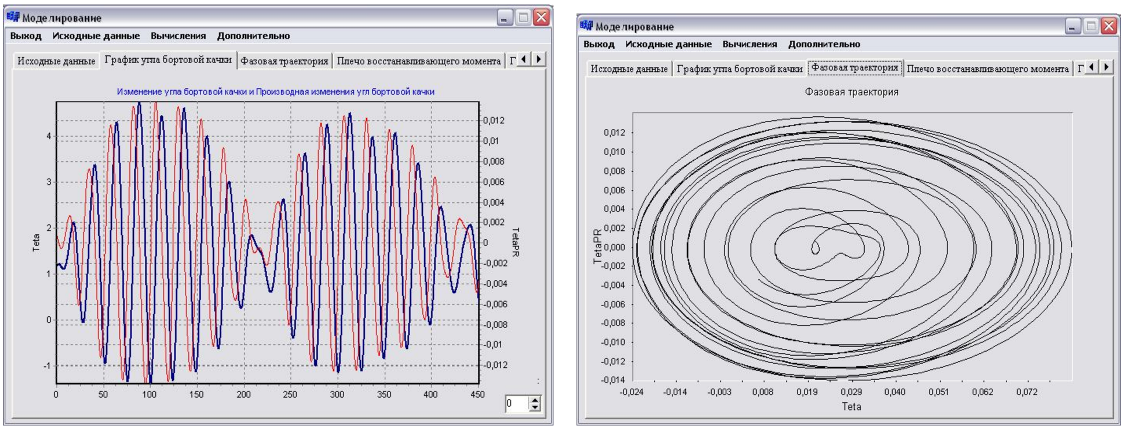


Рисунок 4 – Временные кривые и фазовый портрет колебательных режимов при воздействии пакетов волн

Этот цикл возникает на участке, где последовательность волн в пакете превышает определенное (критическое) значение высоты волны, обеспечивающее колебательный режим с практически постоянной амплитудой. Однако в связи с последующим постепенным уменьшением высот волн в пакете нарушаются условия устойчивости и цикл исчезает. Более сложный сценарий – столкновение с неустойчивым циклом. Такая ситуация на практике встречается значительно реже и характеризуется последовательным прохождением пакетов волн, содержащих волны различной интенсивности. Например, первый пакет с небольшой высотой резонансных волн приводит к формированию предельного цикла малой, а второго – большой амплитуды (рис. 5).

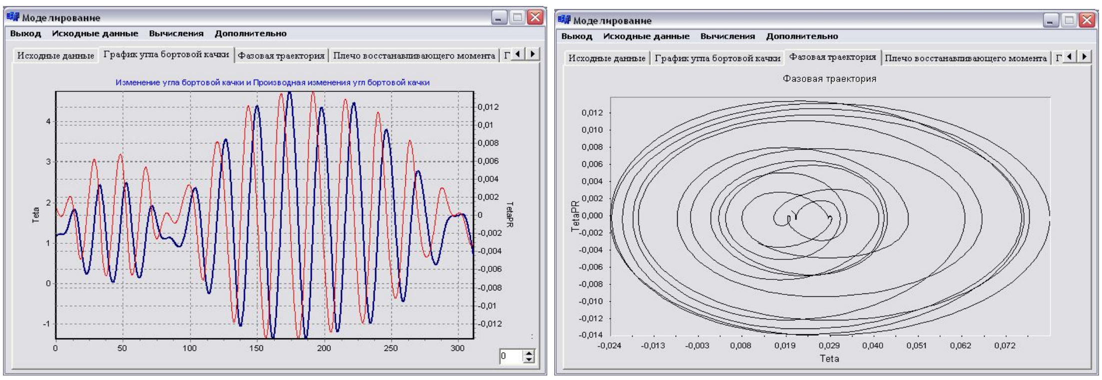


Рисунок 5 – Сложный сценарий возникновения колебательных режимов

Интерпретация сценария, определяющего столкновение с неустойчивым циклом (рис. 4 и 5), позволяет наглядно представить картину колебаний при прохождении пакетов волн, содержащих волны различной интенсивности. Возникновение и потеря устойчивости колебательного режима («рождение и смерть цикла» по терминологии А.А. Андронова [3]) в этом случае происходят вследствие ограниченности зоны резонансной качки на сравнительно небольшом временном интервале интенсивных колебаний при прохождении волновых пакетов.

5. Интерпретация нештатных ситуаций

Тестирование динамической базы знаний при контроле нестандартных ситуаций осуществлялось на основе математической модели, описывающей взаимодействия ДО при различном уровне внешних возмущений. В процессе тестирования рассматривались следующие сценарии:

- Отсутствие критических ситуаций.
- Возникновение катастрофического крена.
- Внезапный налет шквала большой интенсивности.
- Непрерывное нарастание крена.
- Внезапный налет шквала и непрерывное нарастание крена.

Сценарий «Катастрофический крен» (рис. 6) демонстрирует динамику объекта при наличии скачкообразного изменения угла наклонения, вызванного налетом шквала.

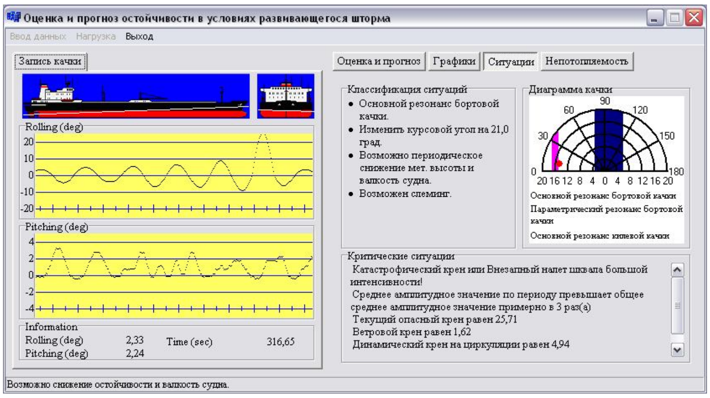


Рисунок 6 – Сценарий «Катастрофический крен»

Сценарий «Внезапный налет шквала большой интенсивности» (рис. 7) демонстрирует возникновение сильной бортовой качки при непрерывном изменении среднего значения угла наклонения.

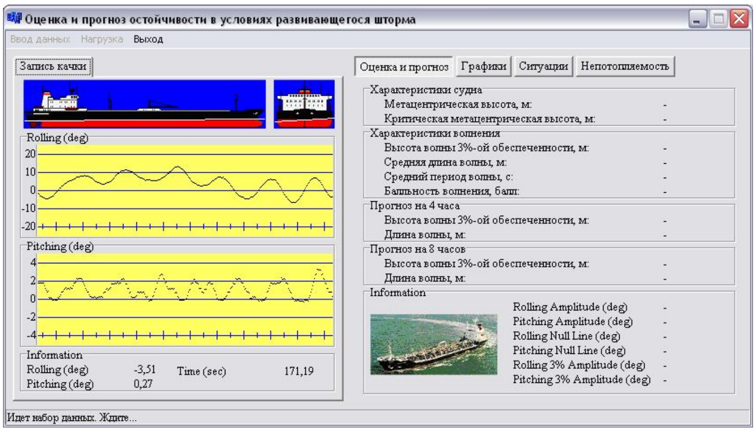


Рисунок 7 – Внезапный налет шквала большой интенсивности

Графическая интерпретация указанных сценариев взаимодействия сопровождается необходимыми пояснениями особенности ситуации с использованием временных кривых и диаграмм качки. Для иллюстрации на рис. 6 и 7 представлены выборочные данные, полученные по результатам тестирования динамической базы знаний.

Заключение

Разработанная информационная технология позволила сформулировать подход к созданию нечеткой системы знаний, обеспечивающих формализацию сложного гидроаэродинамического взаимодействия ДО с внешней средой в нестандартных ситуациях в бортовой ИС. Динамическая база знаний организована в виде системы нечетких логических операторов, позволяющих реализовать следующие процедуры:

– оценку опасности ситуации и прогноз ее развития;
– непрерывный контроль характеристик ДО;
– преобразование информации в условиях неопределенности и неполноты исходных данных.

Анализ функционирования ИС показал, что реализация нечеткой системы знаний эффективна при оценке и прогнозе сложного поведения судна при анализе и интерпретации нештатных и экстремальных ситуаций.

Литература

1. Интеллектуальные системы в морских исследованиях и технологиях / Александров В.Л., Матлах А.П., Нечаев Ю.И., Поляков В.И., Ростовцев Д.М. – Санкт-Петербург: ГМТУ, 2001.
2. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. – М.: Мир, 1976.
3. Андронов А.А., Витт С., Хайкин С.Э. Теория колебаний. – М.: Наука, 1981.
4. Домрачеев В.Г., Безрукавный Д.С., Калинина Э.В., Ретинская И.В., Скуратов А.К. Нечеткие методы в задачах мониторинга сетевого траффика // Информационные технологии. – 2006. – № 3. – С. 2-10.
5. Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. Введение в синергетику. – М.: Наука, 1990.
6. Нечаев Ю.И. Математическое моделирование в бортовых интеллектуальных системах реального времени // Тр. 5-й Всероссийской конференции «Нейроинформатика – 2003». – М.: МИФИ, 2003. – Ч. 2: Лекции по нейроинформатике. – С. 119-179.
7. Нечаев Ю.И., Петров О.Н. Система поддержки принятия решений на основе нечетких знаний о динамике судна в экстремальных ситуациях // Сборник докладов Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM – 2005. – Санкт-Петербург. – 2005. – Т. 2. – С. 66-69.
8. Нечаев Ю.И., Петров О.Н. Формирование аттракторных множеств при исследовании динамики сложной системы в экстремальных ситуациях // Сборник докладов на 4-й Всероссийской научной конференции «Управление и информационные технологии УИТ – 2006». – Т. 2. – С. 45-51.
9. Нечаев Ю.И. Концептуальные основы создания бортовых интеллектуальных систем // Информационно-измерительные и управляющие системы. – Ч. 2: Корабельные системы. – 2006. – № 9. – С. 39-49.

О.Н. Петров
Контроль режиму функціонування бортової інтелектуальної системи у нештатних та екстремальних ситуаціях
Обговорюються алгоритми контролю режиму функціонування інтелектуальної системи в умовах експлуатації. Основну увагу звернено на оцінку нестандартних та екстремальних ситуацій за допомогою нечіткої системи знань. Наведено приклади тестування бази знань оцінки ризику ухвалюваних рішень.

O.N. Petrov
The algorithms of the control of a regime of intelligence system functioning under operating conditions are discussed. The basic attention addresses on an estimation of non-standard and extreme situations with the help of knowledge fuzzy system. The examples of testing of knowledge base of a risk estimation of the accepted decisions are given.

Статья поступила в редакцию 23.07.2008.